

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21580166

研究課題名（和文） 血糖値の上昇抑制作用を有する遅消化性澱粉の物理化学および機能特性に関する研究

研究課題名（英文） Study on physicochemical and functional properties of slowly digestible starch that causes a slow rise in blood glucose after ingestion

研究代表者

佐々木 朋子（SASAKI TOMOKO）

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所・食品機能研究領域・主任研究員

研究者番号：10353939

研究成果の概要（和文）：澱粉消化性の制御要因を明らかにし、澱粉中に遅消化性澱粉（SDS）を増加させる要因を解明するために、澱粉の結晶性と澱粉消化性との関連性の解析、および澱粉の消化作用を制御する多糖類の探索を行うとともに、多糖類を澱粉に混合した試料の物理特性と澱粉消化性の関連性の解析を行った。多糖類の中では、キサンタンガムが消化作用に対して顕著に高い抑制効果を示し、その制御機構には澱粉とキサンタンガムの分子間相互作用が関与していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The effects of starch crystallinity and adding non-starch polysaccharides on the starch digestibility were investigated to alter the starch digestibility and increase the amount of slowly digestible starch (SDS). When compared among non-starch polysaccharides, xanthan gum showed the most pronounced suppressive effect on starch digestibility. The effect of xanthan gum on starch digestibility was considered to be due to the interaction between starch granules and xanthan gum.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	164,551	49,365	213,916
2010年度	935,449	280,634	1,216,083
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	3,500,000	1,049,999	4,549,999

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農芸化学、食品科学・食品化学

キーワード：澱粉、遅消化性、非澱粉性多糖類

1. 研究開始当初の背景

(1) 澱粉は、主食となる穀類の主成分であり、従来ヒトの主要なエネルギー源として考えられてきたが、糖尿病患者の急激な増加が深刻な問題となっている昨今では、食後の血糖上昇を考慮した澱粉食品の摂取方法が重要な課題となっている。

(2) 小腸内での澱粉の消化速度は、食後血糖の上昇に影響を及ぼし、グルコース生成速度の遅い澱粉食品が血糖上昇速度も緩やかになり、望ましいと考えられている。Englyst et al. は、人工消化液を用いた澱粉消化性の *in vitro* 評価法を用いて、澱粉を消化性によつ

て易消化性澱粉 (RDS: Rapidly Digestible Starch)、遅消化性澱粉 (SDS: Slowly Digestible Starch)、難消化性澱粉 (RS: Resistant Starch) の 3 種類に分類し、RDS:SDS:RS の比率は澱粉消化性の指標として、国際的に広く利用されている。

(3) 血糖の上昇度を指数化したグリセミック・インデックス (GI) と SDS 含量との間に有意な相関性があることが報告されたことから SDS の重要性が注目され、栄養的な観点からも消化・吸収されない RS よりも、ゆっくり消化・吸収され、食後血糖の上昇が緩やかに持続性のある SDS の含量を澱粉および澱粉食品中に高めることが望まれている。

(4) 欧米では SDS に着目した新素材開発が行われているが、SDS の生成要因および機能特性については未解明な部分が多く、今後は特に食品加工までを想定した SDS の研究が必要である。

(5) 申請者らはすでに、一般的な糯米よりも緩やかに消化される糯米品種を世界で初めて見出しており、アミロペクチンの側鎖長分布と消化性の関連性を明らかにしている。さらに水晶振動子マイクロバランス (QCM) を用いて、バレイショ澱粉との相互作用によって消化速度を抑えるバイオポリマーの作用を明らかにしている。そこで本研究ではこれまでの研究成果をさらに発展させ、澱粉の結晶性、物理特性、および共存成分との相互作用を解析することによって、緩やかな消化速度を示す遅消化性澱粉 (SDS) の生成要因を食品加工までを想定して網羅的に説明することを目指す。

2. 研究の目的

(1) 遅消化性を示す SDS の結晶特性の解明

澱粉粒は物理的には結晶部位と非晶質部位 (アモルファス) を含み、非晶質部位に比べると結晶部位は消化抵抗性が高い。従って、結晶性をコントロールすることによって SDS 含量の上昇が期待できる。本研究では、生澱粉および老化澱粉の結晶性と澱粉消化速度の関連性を解明し、SDS となりうる澱粉の結晶性の特徴を明らかにする。

(2) SDS を増加させる物理的要因の解明

物理的に澱粉と消化酵素の接触を妨げ、酵素の分散性、浸透性を制御することで、澱粉の消化速度を抑制でき、SDS 含量の上昇が期待できる。本研究では、澱粉試料の物理的パラメータと澱粉の消化速度の関連性を解析し、SDS 含量の上昇につながる物理特性を明らかにする。

(3) SDS 増強に寄与する共存成分と澱粉の相互作用の解明

澱粉粒の表面に他のバイオポリマーを吸着させ、消化酵素の作用を阻害することによって、澱粉中の SDS 含量を増加させることが期待できる。そこで、本研究では澱粉の消化作用を制御するバイオポリマーを探索し、そのメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 遅消化性を示す SDS の結晶特性の解明

遺伝背景の異なる糯米澱粉を用いて、澱粉の結晶性および再結晶化の程度と澱粉の消化速度の関連性を解析し、緩やかな消化速度を示す SDS の結晶特性を明らかにした。

[具体的な手法]

① SDS の定量及び澱粉消化速度の解析: ヒトの胃内および小腸内の消化環境を模擬した代表的な *in vitro* 評価法である Englyst et al. の手法を改良して用いた。

② 結晶性の解析: 示差走査熱量測定 (DSC)

(2) SDS を増加させる物理的要因の解明

食品の単純なモデル系として澱粉と多糖類を混合したゲル、および澱粉を分散させた溶液を試料とし、ゲル構造の強度、緻密さを反映する物理特性および分散液の粘性と澱粉の消化速度の関連性を解析した。

[具体的な手法]

① ゲルの物理特性の解析: テクスチャアナライザーを用いた圧縮・破断特性の解析、微小変形下での動的粘弾性の解析

② 分散液の粘性測定: コーンプレートを用いた粘度測定

(3) SDS 増強に寄与する共存成分と澱粉の相互作用の解明

澱粉に多糖類を混合した系について、*in vitro* 評価法を用いて澱粉の消化性を解析し、澱粉の消化速度を抑制する多糖類を探索した。抑制効果が確認できた多糖類について、水晶振動子マイクロバランス (QCM) を用いて澱粉と多糖類の分子間の相互作用の解析を行った。

4. 研究成果

(1) 遅消化性を示す SDS の結晶特性の解明

糯米から精製した澱粉を試料として、澱粉ゲルを調製し、*in vitro* 評価法による澱粉消化性の解析を行ったところ、顕著に消化速度の遅い糯米品種を見出したので、その品種を含め 3 品種の糯米澱粉の結晶性および再結晶化の程度を DSC によって解析した。生澱粉の結晶性を比較すると、消化速度の遅い糯米澱

粉は糊化開始、ピーク、終点温度および糊化時の吸熱エンタルピーが他の糯米澱粉より顕著に高く、吸熱ピークの幅が狭かったため、結晶部が多く、規則正しい結晶性をもつ澱粉であることが示唆された。さらに澱粉ゲルを調製した後、1日および7日間冷蔵保存することによって澱粉を老化させた試料のDSC測定を行った。澱粉ゲルの消化速度が遅い試料では、冷蔵1日後の再糊化時の吸熱エンタルピーが極めて高く、澱粉の再結晶化(老化)が急速に進行していることが示された。さらに7日間冷蔵保存したゲルについても再糊化時の吸熱エンタルピーが高い傾向が認められた。以上の結果から、澱粉ゲルの消化速度が遅い糯米澱粉は、生澱粉および再結晶化(老化)した澱粉のいずれの場合も他の試料に比べて結晶化の程度が高く、その結晶性の違いが消化抵抗性の要因になっていることが考えられた。

(2) SDS を増加させる物理的要因の解明

① 澱粉と多糖類の混合ゲルにおける消化性と物理特性の関連性

食品の単純なモデル系として米澱粉に非澱粉性多糖類(寒天、キサンタンガム、コンニャクグルコマンナン)を添加した混合ゲルを調製した。非澱粉性多糖類を添加しない米澱粉のゲルを標準試料として、標準試料と混合ゲルについて *in vitro* 評価法による澱粉消化性の解析とゲルの物理特性の解析を行った。非澱粉性多糖類を澱粉ゲルに添加することによって、いずれの多糖類も澱粉消化性に対する抑制効果を示し(図1)、SDSが増加する傾向が認められた。また、その抑制効果には添加した非澱粉性多糖類の濃度依存性が認められた。

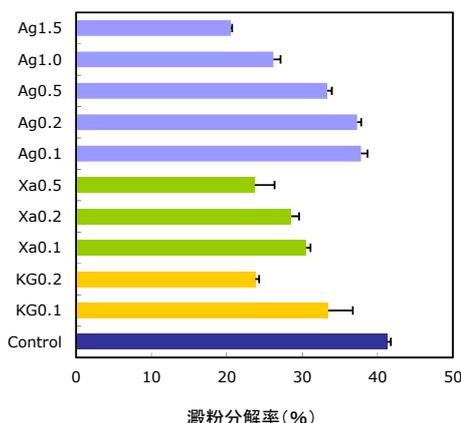


図1. 多糖類を添加した澱粉ゲルの澱粉分解率
コンニャクグルコマンナン(KG:0.1、0.2%)、キサンタンガム(Xa:0.1、0.2、0.5%)、寒天(Ag:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5%)を30%の米澱粉に添加したゲルを使用。

一方、添加した非澱粉性多糖類の澱粉ゲル

の物理特性に及ぼす影響は、多糖類の種類によって異なっていた。寒天とキサンタンガムを添加した澱粉ゲルの貯蔵弾性率は、標準試料よりも高かったが、コンニャクグルコマンナンを添加した澱粉ゲルでは、貯蔵弾性率の低下が認められた。澱粉ゲルの破断応力および破断変形率は非澱粉性多糖類の添加により低下し、標準試料よりもろくてこわれやすいゲルの特徴を示した。以上の結果から、非澱粉性多糖類の澱粉消化性に対する抑制効果は、澱粉ゲルのゲル構造の強度、緻密さなどの物理特性を反映しているのではなく、澱粉と非澱粉性多糖類の分子間の相互作用の影響が考えられた。

② 澱粉と多糖類の混合懸濁液における消化性と物理特性の関連性

澱粉と非澱粉性多糖類の分散系を用いて、澱粉の消化作用を制御する多糖類の探索を行うとともに、分散系の粘度と澱粉消化性との関連性の解析を行った。ハイアミロースコーンスターチおよび米澱粉に多糖類(キサンタンガム、グアガム、コンニャクグルコマンナン、ペクチン)を添加した分散系について、*in vitro* 評価法による澱粉消化性の解析と、レオメーターを用いて粘度の解析を行った。添加した多糖類はすべて、消化酵素による澱粉分解性に対して抑制効果を持ち、澱粉中のSDSを増加させる傾向を示した。澱粉分解性に対する抑制効果の程度は、多糖類の種類によって異なり、キサンタンガムが顕著に高い抑制効果を示した(図2)。

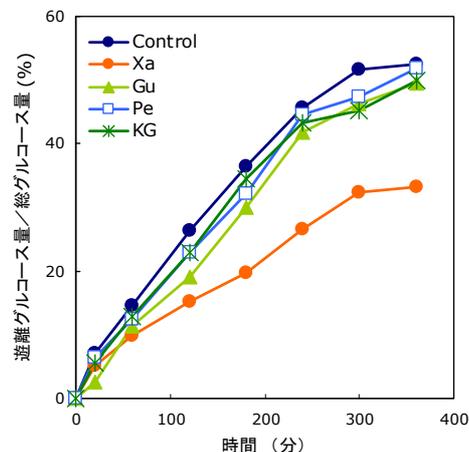


図2. 多糖類を添加した澱粉懸濁液の澱粉分解率
キサンタンガム(Xa)、グアガム(Gu)、ペクチン(Pe)、コンニャクグルコマンナン(KG)を5mg/mlの濃度で添加。

添加した多糖類には増粘効果があり、澱粉懸濁液に添加すると粘度は上昇した。粘度の試料間の傾向はざり速度によって異なり、ざり速度が1.15(1/s)以上では、コンニャクグルコマンナンを添加した澱粉懸濁液が最も高い粘度を示したが、1.15(1/s)以下ではキ

キサンタンガムがコンニャクグルコマンナンより高い値を示した。粘度が高いコンニャクグルコマンナンよりも、粘度を上昇させる効果の低かったペクチンの方が澱粉分解性に対する抑制効果が高かったことから、多糖類の種類による抑制効果の差は、粘度の違いでは説明できないことが明らかになった。澱粉懸濁液に混合した多糖類4種類について、透析膜を用いて多糖類共存下での透析外液のグルコース量を測定し、グルコース単体の量と比べると、キサンタンガムの共存下ではグルコース量が顕著に少ないことから(図3)、グルコースとキサンタンガムの相互作用により拡散が遅くなり、分解が抑制されることが推察された。

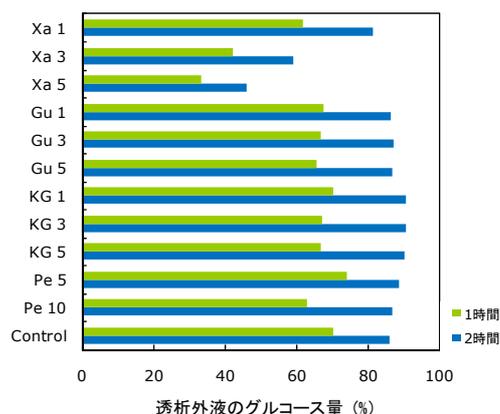


図3. 多糖類共存下での透析外液中のグルコース量の比較
キサンタンガム(Xa:1、3、5mg/ml)、グアガム(Gu: 1、3、5mg/ml)、コンニャクグルコマンナン(KG: 1、3、5mg/ml)、ペクチン(Pe: 5、10mg/ml)をグルコース+酵素反応液に添加。

(3) SDS 増強に寄与する共存成分と澱粉の相互作用の解明

澱粉の消化速度を抑制する多糖類について、その制御機構を明らかにするために、QCMを用いて、澱粉と多糖類の相互作用の解析を行った。QCMによって相互作用の解析を行うために、QCMのセンサー上に澱粉を固定化させる方法を検討した。その結果、馬鈴薯アミロペクチンのもつリン酸基を利用し、電荷の違いによりセンサー上に安定して吸着するリジン層の上に、馬鈴薯アミロペクチンが吸着することを確認した。さらに分散媒としてマレイン酸バッファーを使用すると馬鈴薯アミロペクチンが安定して吸着することを確認した。センサー上の固定化させた馬鈴薯アミロペクチン層上に、*in vitro* 評価系によってすでに、消化酵素による澱粉分解性に対して抑制効果をもつことが明らかになった多糖類(キサンタンガム、グアガム、コンニャクグルコマンナン、ペクチン)を添加し、馬鈴薯アミロペクチンと多糖類の相互作用を解析した。グアガム、コンニャクグルコマンナン、ペクチンを添加した際には周波数の増加が見られたが、キサンタンガムのみ周波

数の減少が認められたため、アミロペクチン層にキサンタンガムが吸着し、質量が増加したために周波数が減少したと考えられる。さらに、キサンタンガム層に澱粉分解酵素の α -アミラーゼを添加したところ、周波数の変化がほとんど見られず、キサンタンガムの層により、アミロペクチンの酵素分解が阻害されることが明らかになった。これらの結果から、キサンタンガムが示した澱粉分解性に対する高い抑制効果は、澱粉とキサンタンガムの分子間の相互作用が主な要因であることが推察された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

① Tomoko Sasaki(他5名、1番目), Characterization of waxy rice cakes (Mochi) with rapid hardening quality by instrumental and sensory methods. Cereal Chemistry, 査読有, 90巻, 2013, 101-106

DOI:dx.doi.org/10.1094/CCHEM-05-12-0058-R

② Dede R. Adawiyah, Tomoko Sasaki, Kaoru Kohyama, Characterization of arenga starch in comparison with sago starch. Carbohydrate Polymers, 査読有, 92巻, 2013, 2306-2313

DOI:dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.12.014

③ Tomoko Sasaki, Kaoru Kohyama, Influence of non-starch polysaccharides on the *in vitro* digestibility and viscosity of starch suspensions. Food Chemistry, 査読有, 133巻, 2012, 1420-1426

DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.02.029

④ Kiyoshi Kawai, Setsuko Takato, Tomoko Sasaki, Kazuhiro Kajiwar, Complex formation, thermal properties, and *in-vitro* digestibility of gelatinized potato starch-fatty acid mixtures. Food Hydrocolloids, 査読有, 27巻, 2011, 228-234

DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.07.003

⑤ Tomoko Sasaki, Kaoru Kohyama, Effect of non-starch polysaccharides on the *in vitro* digestibility and rheological properties of rice starch gel. Food Chemistry, 査読有, 127巻, 2011, 541-546

DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.038

[学会発表] (計5件)

① 佐々木朋子, 米粉パンの老化に及ぼすアミロペクチン再結晶化の影響、日本農芸化学会2013年度大会、2013年3月25日、東北大学(宮城)

② 佐々木朋子, 馬鈴薯澱粉の酵素分解性に及ぼす非澱粉性多糖類との相互作用の影響、日

本応用糖質科学会平成 24 年度大会、2012 年 9 月 20 日、東京農工大学（東京）

③佐々木朋子、餅の消化酵素に対する耐性機構の解明、日本農芸化学会 2012 年度大会、2012 年 3 月 24 日、京都女子大学（京都府）

④佐々木朋子、Effect of non-starch polysaccharides on the in vitro digestibility of raw starches、Plant polysaccharide and applied glycoscience workshop 2010、2010 年 7 月 30 日、笹川記念会館（東京）

⑤佐々木朋子、Effect of starch characteristics on the in vitro digestibility of concentrated starch gels prepared from waxy rice、38th Meeting of the UJNR food and agriculture panel meeting、2009 年 10 月 6 日、つくば国際会議場（茨城）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 朋子 (SASAKI TOMOKO)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所・食品機能研究領域・主任研究員

研究者番号：10353939

(2) 研究分担者

神山 かおる (KOHYAMA KAORU)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所・食品機能研究領域・上席研究員

研究者番号：00353938